**Titre de la thèse:**

**Performances énergétiques de parois en béton incorporant des matériaux à changement de phase (MCP): approche expérimentale et modélisation du comportement thermo-hydrique.**

**Année 2020**

**Laboratoire principal**

Laboratoire NAVIER

**Spécialité de la thèse**

Matériaux et structures

**CONTEXTE, OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES**

En France, le secteur du bâtiment et de la construction est à l’origine d’environ 45 % de l’énergie consommée et de 23 % des émissions de CO2. L’amélioration de l’efficacité énergétique des bâtiments est donc devenue en enjeu majeur et incontournable pour les pouvoir publics, qui n’hésitent plus à appliquer des règlementations contraignantes en la matière. Dans ce contexte, la recherche s’oriente notamment vers le développement de matériaux innovants, qui soient à la fois plus respectueux de l’environnement et capables de générer des gains significatifs en termes de performances énergétiques et de confort des usagers.

Parmi les solutions envisagées, les matériaux à changement de phase (MCP) offrent des perspectives particulièrement intéressantes. En effet, les MCP sont capables de stocker de l’énergie par chaleur latente dans un volume réduit, puis de diffuser cette énergie lors d’un changement de phase. Ils peuvent être intégrés dans des matériaux de construction classiques (plâtre, ciment, béton) destinés à l’enveloppe des bâtiments, et permettent en théorie d’augmenter l’inertie thermique de la structure en période hivernale, et d’améliorer le confort thermique des occupants pendant les périodes de surchauffe. En outre, les MCP peuvent aussi bien convenir à la conception de constructions nouvelles, que servir à la rénovation du bâtit ancien.

Néanmoins, du fait de leur introduction relativement récente sur le marché, les matériaux à base de MCP restent encore largement méconnus et font toujours l’objet de recherches visant à mieux cerner leurs propriétés intrinsèques ou à optimiser leurs performances et durabilité. Plusieurs études de la littérature se sont ainsi intéressées aux propriétés thermo-physiques des MCP et des matériaux cimentaires incorporant des MCP, le plus souvent sous forme micro-encapsulée (paraffine contenue dans des microcapsules de polymère PMMA). La plupart de ces travaux ont porté spécifiquement sur la caractérisation de ces matériaux par DSC (calorimétrie différentielle à balayage), sur des observations morphologiques / microstructurales ou encore sur leur caractérisation mécanique [1-2]. En revanche, le comportement thermo-hydrique des MCP reste un sujet très peu abordé voire quasi-inexistant dans la littérature, particulièrement lorsque l’on passe de l’échelle « matériau » à l’échelle « paroi ». La connaissance de ce comportement à l’échelle de la structure est pourtant primordiale si l’on souhaite évaluer de manière rigoureuse les gains générés par les MCP en termes de performances énergétiques et de confort thermique/hydrique des usagers, et en vue de favoriser le développement plus large de ces matériaux dans le domaine de la construction.

Cette thèse vise donc à démontrer la viabilité technique et les performances de la solution de stockage d’énergie par chaleur latente dans les structures intégrant des MCP. Elle porte plus particulièrement sur le comportement Thermo-Hydrique e de bétons incorporant des MCP, notés BCP (Bétons à Changement de Phase), et vise à mieux appréhender les performances énergétiques de structures de bâtiments en BCP.

Le projet s’appuie en premier lieu sur une campagne expérimentale complète de l’échelle matériau à l’échelle de la structure (paroi) et permettra in fine, d’analyser le comportement de murs en BCP soumis à différents scénarios thermo-hydriques représentatifs des conditions climatiques réelles. Les données collectées dans le cadre de cette approche expérimentale seront ensuite utilisées pour caler des modèles prédictifs intégrant à la fois les transferts thermiques et les transferts de masse dans les structures en BCP.

**DEROULEMENT DE LA THESE**

Ce sujet multidisciplinaire s’inscrit dans le cadre du développement de nouveaux matériaux dits « environmentally friendly » adaptés à l’isolation thermique pour les bâtiments durables de demain. Les matériaux visés sont des MCP intégrés dans le béton. Des résultats préliminaires à l’échelle matériau [3], ont permis de maitriser d’une part le procédé de mise en œuvre des BCPs, et d’autre part, d’identifier la formulation présentant les propriétés thermiques et mécaniques les plus prometteuses pour une application dans le bâtiment. Il s’agit donc de poursuivre et étendre le travail à l’investigation du comportement thermo-hydriques des BCPs à l’échelle d’une paroi en prenant en compte différents scénarios de sollicitations météorologiques.

Dans cette optique, un mur de dimension représentative (50x50x10 cm3) sera réalisé à base de mortier en intégrant des MCP dans sa formulation (microcapsules de paraffine). D’autres échantillons BCPs de taille plus réduite seront également élaborés afin d’effectuer des tests de capacité tampon hydrique (MBV) à différentes températures. Une troisième série d’échantillons fabriquée pour évaluer les variations de propriétés mécaniques (résistance en compression et en flexion) des BCPs en fonction de la température et de l’humidité.

Le mur BCP sera instrumenté par plusieurs capteurs de température et d’humidité qui seront disposés à différentes profondeurs, et l’ensemble sera placé dans une enceinte bi-climatique. Cette dernière permettra de créer différents scénarios météorologiques en variant la température et l’humidité au niveau des deux extrémités de la paroi, permettant ainsi d’étudier le comportement thermique et hydrique du mur BCP. Une enceinte climatique avec une balance pilotable seront utilisés afin de déterminer la capacité du tampon hydrique du BCP d’abord à une température inférieure à la température de fusion de la paraffine contenue dans les microcapsules MCP (Tf ~ 23 à 26°C), puis ensuite à une température supérieure à cette valeur critique. Enfin, des mesures mécaniques seront effectuées sur des échantillons pré-conditionnés à différents couples température – humidité relative.

Dans la deuxième partie, une étude numérique sera réalisée permettant de prédire les profils de température et d'humidité dans le mur BCP en intégrant en plus un modèle de capacité thermique massique apparente. L’idée de base est de représenter la variation de l’enthalpie en fonction de la température comme une variation finie de la capacité thermique apparente [4-8].

Une approche numérique complémentaire visant à modéliser le comportement mécanique des BCP (par méthode d’homogénéisation par exemple) pourrait être traitée en collaboration avec un Laboratoire tiers membre du LABEX MMCD "Matériaux pour les nouvelles méthodes de construction".

De manière générale, cette étude de thèse se démarque des travaux existants (notamment la thèse de S. Guichard [7]) et apportera des éclairages nouveaux sur plusieurs points:

* une première différence concerne le type de matériau étudié : il s’agit ici d’un béton incluant des capsules MCP fabriqué en laboratoire à partir d’une formulation optimisée, et destiné à être employé dans l’enveloppe externe des bâtiments. On notera que l’étude de S. Guichard a été menée sur des panneaux de Placoplatre industriels de faible épaisseur incluant des MCP (panneaux Energain de la société Dupont) et destinées principalement au cloisonnement interne des habitations ou à un complément d’isolation des toitures,
* ensuite, cette étude propose une véritable approche multi-physique, puisqu’il s’agit de mieux comprendre les couplages entre différents phénomènes intervenant au sein même de la paroi BCP, à savoir les couplages entre transfert de chaleur / transfert hydrique (vapeur d’eau) / changement de phase des capsules MCP. Cette partie expérimentale est rendue possible grâce à l’insertion de capteurs (T/HR) in-situ dans l’épaisseur de la paroi. Pour mémoire, la thèse de S. Guichard s’était restreinte à une simple étude du transfert thermique en omettant l’aspect hydrique qui joue pourtant un rôle très important sur le confort des habitant,
* de plus, les données collectées permettrons de calibrer un outil de modélisation complet intégrant ces différents phénomènes multi-physiques et leurs couplages à l’échelle de la paroi. Cet outil permettra de prévoir le comportement global (thermique/hydrique/changement de phase) d’un mur en BCP sur base véritablement scientifique, et de dépasser ainsi les approches classiques qui restaient largement empiriques.

Une collaboration avec une autre équipe du LABEX MMCD sera recherchée pour la partie concernant la modélisation du comportement mécanique.

**RESULTATS ATTENDUS ET VALORISATION**

- Publications dans des revues scientifiques

- Modèles de prévision du comportement thermo-hydrique des structures en BCP

- Recommandations sur l’utilisation des BCP

- Journées de valorisation auprès des industriels du BTP.

**RÉFÉRENCES**

[1] Drissi S., Eddhahak A., Neji J., Care S., Thermal analysis by DSC of Phase Change Materials, study of the damage effect, Journal of Building Engineering 1, p.13-19, 2015

[2] Eddhahak. A, Drissi. S, Colin. J, Neji. J, Care. S. Experimental and multi-scale analysis of the thermal properties of Portland cement concretes embedded with microencapsulated phase change materials (PCMs), Appl Therm Eng., 64:32–9, 2013.

[3] Drissi S., Développement de nouveaux bétons « accumulateurs d’énergie », investigations expérimentale, probabiliste et numérique du comportement thermique, thèse de Doctorat de l’Université Paris-Est en cotutelle avec la Tunisie, 2015.

[4] Haba B., Agoudjil B., Boudenne A. and Benzarti K., Hygric properties and thermal conductivity of a new insulation material for building based on date palm concrete, Construction and Building Materials, 154, 963–971, 2017.

[5] Benmansour N., Agoudjil B., Boudenne A., Gherbli A., Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building, Energy and Buildings, 81, 98-104, 2014.

[6] Alioua T., Agoudjil B., Boudenne A., Numerical study of heat and moisture transfers for validation on bio-based building materials and walls. NME2018 Ghent, Belgium 28-29 August, 2018.

[7] Stéphane Guichard, Contribution à l’Étude des Parois Complexes intégrant des Matériaux à Changements de Phase : Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale, Thèse de Doctorat, université de La Réunion 2013.

[8] Kévyn JOHANNES, et al. Matériaux à changement de phase intégrés dans les parois : impact de la modélisation du changement de phase sur le comportement thermique du bâtiment, Conférence IBPSA France-Arras-2014

**Mots-clefs :**

MCP, Béton, comportement Thermo-Hydrique, structure de bâtiment, mur, efficacité énergétique, modélisation, transfert de chaleur et de masse

***CONTACT***

Anissa EDDHAHAK – Laboratoire PIMM (Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux), ENSAM-Paris

[Anissa.eddhahak@ensam.eu](mailto:Anissa.eddhahak@ensam.eu)